

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Patentschrift
11 DE 2727 704 C3

21 Aktenzeichen:
22 Anmeldetag:
43 Offenlegungstag
44 Bekanntmachungstag:
45 Veröffentlichungstag:
Patentschrift weicht von Auslegeschrift ab

P 27 27 704.9-52
21. 6. 77
11. 1. 79
13. 6. 79
9. 12. 82

51 Int. CL 3:
G 01 L 1/22
G 01 L 5/00
G 01 B 7/18
B 25 J 15/00

74 Patentinhaber:
Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und
Raumfahrt e.V., 5000 Köln, DE

72 Erfinder:
Schmieder, Lothar, Dipl.-Phys. Dr., 8031 Gilching, DE;
Vilgertshofer, August, 8031 Oberpfaffenhofen, DE; Mettin,
Florian, 8031 Eichenau, DE

56 Entgegenhaltungen:
DE-OS 25 29 796
DE-OS 21 04 003
DE-Z: ATZ 69, 1987, 8, Seiten 251 bis 255;
US-Z: Gen. Mot. Engin. J., 11, 1964, 4, Seiten 15 bis 18;
MIT-Report, Nr. 6-2754, März/Sept. 1973;
Perry and Lissener: The Strain Gauge Primer, Seiten 212
bis 216, N.Y., 1954;

54 Kraft-Drehmoment-Fühler

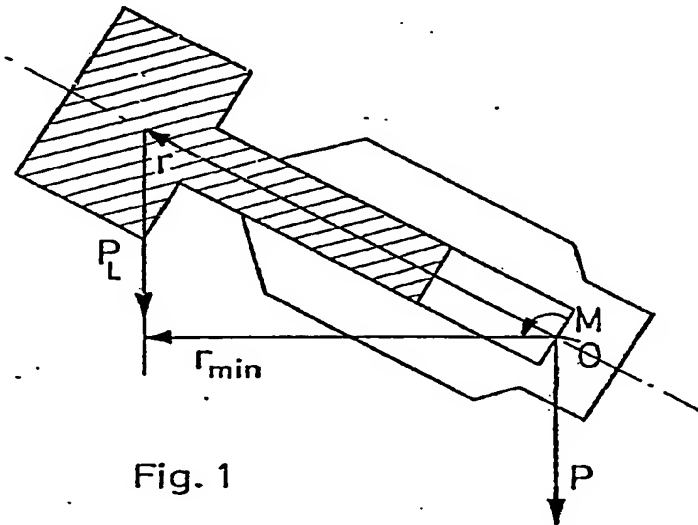


Fig. 1

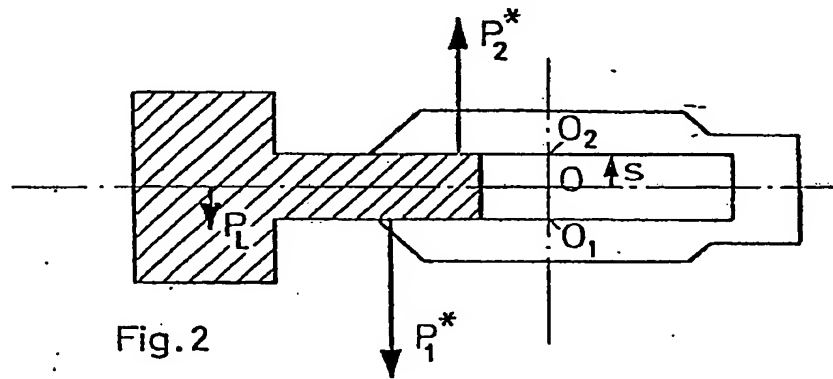


Fig. 2

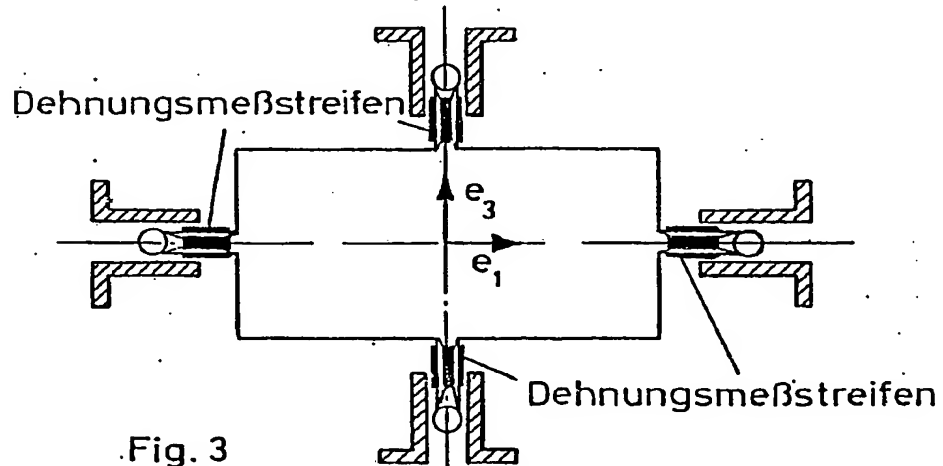


Fig. 3

Patentansprüche:

1. Kraft-Drehmoment-Fühler mit einer starren ersten Platte und einer parallel dazu angeordneten starren zweiten Platte, die miteinander durch deformierbare Stützen verbunden sind, und mit einem Zwischenstück, über das die zweite Platte mittels parallel zu ihr sich erstreckender, verformbarer Speichen und mindestens drei senkrecht sich dazu erstreckender, verformbarer Stützen fest mit der ersten Platte verbunden ist, wobei die Speichen und Stützen im Verhältnis zu den Platten und dem Zwischenstück so dimensioniert sind und Dehnungsmeßstreifen auf den Speichen und Stützen so angebracht sind, daß die angreifenden Kräfte und Drehmomente allein durch Biegung der Verformungskörper meßbar sind, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens drei parallel zu den Platten (1, 2) und dem Zwischenstück (3) sich erstreckende und in einer Ebene liegende Speichen vorhanden sind.

2. Kraft-Drehmoment-Fühler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke und Breite des Zwischenstücks (3) mindestens doppelt so groß wie die entsprechenden Abmessungen der Stützen (5) und der Speichen (4) sind.

3. Kraft-Drehmoment-Fühler nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die starre Verbindung zwischen den Platten (1, 2) und dem Zwischenstück (3) sowie den Stützen (5) und den Speichen (4) dadurch erreicht wird, daß die gesamte Anordnung aus einem einzigen Metallstück gefräst bzw. gedreht wird oder die starre Verbindung durch Hartlöten Kleben oder ähnliche Verfahren zustande kommt.

4. Kraft-Drehmoment-Fühler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Dehnungsmeßstreifen (7) auf den parallel zur Grundplatte liegenden Flächen der Speichen (4) und auf den senkrecht zur Kreisperipherie liegenden Flächen der Stützen (5) angebracht sind.

Die Erfindung betrifft einen Kraft-Drehmoment-Fühler entsprechend dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Mit einem Kraft-Drehmoment-Fühler können beispielsweise an einer Greifzange angreifende Kräfte und Drehmomente gemessen werden. Derartige Vorrichtungen werden insbesondere bei Manipulatoren eingesetzt, die zur Erfüllung ihrer komplexen Aufgaben (z. B. Montage oder Qualitätskontrolle) einen Informationsaustausch mit der Umwelt benötigen.

Fig. 1 zeigt eine derartige Greifzange, die ein Werkstück festhält, und deren Schließen zweckmäßig durch eine pneumatische Einrichtung bewirkt wird, bei welcher der Anpreßdruck leicht geregelt werden kann. Werden im Punkt 0 die dort angreifenden Kräfte und Momente gemessen, so kann der den Manipulator steuernde Prozeßrechner nicht nur das Gewicht P_L der Last, sondern mit Hilfe des gemessenen Drehmoments

M auch den minimalen Hebelarm (r , P und M sind Vektoren)

$$r_{min} = \frac{P \times M}{P^2} \quad (1)$$

messen. Da der Angriffspunkt einer Kraft längs ihrer Angriffslinie beliebig verschoben werden kann, ist eine Berechnung des wahren Hebelarms r nicht möglich. Es können auch reine Lastdrehmomente auftreten, z. B. beim Eindrehen einer Schraube. Diese können nur dann eindeutig gemessen werden, wenn die Lastangriffslinie durch den Bezugspunkt geht, so daß das von der Last verursachte Drehmoment Null wird.

Fig. 2 zeigt eine Konstruktion, bei welcher in jedem Finger der Zange eine Meßvorrichtung eingebaut ist. Es gelten für den in der Mitte von O_1 und O_2 liegenden Punkt 0 die Gleichgewichtsbedingungen (P_1 , M_1 , P_2 , M_2 — in Fig. 2 nicht eingezeichnet — werden auf die Punkte O_1 , O_2 bezogen, ist ein Vektor)

$$P_L = P_1 + P_2,$$

$$M_L = P_L \times r_{min} = (P_2 - P_1) \times s + M_1 + M_2. \quad (2)$$

die wiederum P_L und r_{min} eindeutig festlegen, wenn die Öffnungsweite $2s$ der Zange bekannt ist. Da Gleichung (1) aber auch auf jeden Finger von Fig. 2 angewendet werden kann, sind auch die Angriffspunkte der Resultanten P_1^* , P_2^* bekannt, schließlich liefert die zweite Komponente ($P_2^* - P_1^*$), durch zwei dividiert, den Anpreßdruck der Zange. Damit ist es möglich, eine Greifhand nach Fig. 2 mit einem Elektromotor über eine Wegsteuerung zu betreiben, die durch laufendes Abfragen des Anpreßdrucks und entsprechende Korrekturen in eine Kraftsteuerung umgewandelt wird, wobei die Öffnungsweite der Handzange jederzeit bekannt ist, so daß auch Werkstücke vermessen werden können. Schließlich ist es möglich, das Gleiten eines Werkstücks festzustellen, da beim Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung eine plötzliche Verminderung der Tangentialkraft auftritt.

Durch Anordnung von Dehnungsmeßstreifen können die an einem starren Körper angreifenden Kräfte und Momente festgestellt werden. Die Entkopplung der durch die verschiedenen Kräfte verursachten Dehnungen bereitet erhebliche Schwierigkeiten. Bei einem bekannten Fühler der eingangs genannten Art (Report Nr. E-2754 des Massachusetts Institute of Technology, März 1973) ist eine Aufnehmerplatte an vier Balken aufgehängt (s. hierzu Fig. 3). Jeder Balken enthält je zwei Dehnungsmeßbrücken, welche die Verkrümmungen in zwei zueinander senkrechten Richtungen messen und ist am Ende mit einer Kugel abgeschlossen. Die Kugeln gleiten in vier Hülsen, in denen sie in Richtung der Balkenlängsachse gleiten können. Eine Normalkraft bewirkt dabei eine Durchbiegung der vier Balken, die von den Dehnungsmeßstreifen erfaßt und von einem Rechner ausgewertet werden. Auf diese Weise können die Normalkraft und die von ihr bei außermittigem Angriffspunkt bewirkten Drehmomente um die Achsen e_1 und e_2 gemessen werden. Eine senkrecht dazu wirkende Tangentialkraft bewirkt eine Durchbiegung von nur zwei Balken, während die restlichen beiden Balken sich verschieben können und nicht beansprucht werden.

Wenn nun aber Tangential- und Vertikal-Kräfte gleichzeitig auftreten, wird die Normalkraft die Kugeln gegen die Hülsen pressen und damit eine Haftreibung

erzeugen, die einen Teil der äußeren Tangentialkraft kompensiert, der für die Messung verloren ist. Reibungskräfte, welche die Messungen verfälschen, treten auch auf, wenn die Vorrichtung verformt worden ist, was schon bei kurzzeitiger Überbelastung auftreten kann, so daß vier Kugeln samt ihren Hülsen nicht mehr streng in einer Ebene liegen.

Dieselben Schwierigkeiten bestehen auch bei einem verbesserten Fühler, der in der DE-OS 25 29 796 beschrieben ist. Bei diesem Fühler ist eine Nabe (14; siehe Fig. 5 der DE-OS) an vier freitragenden Armen (16 bis 22) in dem Gehäuse (12) eingehängt, wobei die kugelförmigen Enden der Arme sich wieder in Richtung der Längsachse der Arme verschieben können. Eine Verbesserung gegenüber der alten Anordnung gemäß Fig. 2 wird dadurch erreicht, daß für die Messung Verlagerungsgeber eingesetzt werden, welche die Verschiebung eines Speichenkreuzes (32) und eines Flansches (30) messen. Damit ist der oben geschilderte grundsätzliche Fehler jedoch nicht behoben.

Ferner sind Kraft-Drehmoment-Fühler bekannt, bei welchen zwei Speichenkreuze verwendet sind, die eine Messung von Biegelinien unmöglich machen bzw. stark verfälschen. (DE-OS 21 04 003; Gen. Mot. Engin. J. 11 (1964) 4, S. 15 bis 18; ATZ 69 (1967) 8, S. 251 bis 255). Die DE-OS 21 04 003 dürfte sich aus diesem Grund auch auf die Messung von reinen Stauchungen bzw. Messungen beschränken, wobei auf die etwa 10mal größere Meßempfindlichkeit der Biegunsmessungen verzichtet worden ist.

Es ist ferner bereits ein Kraft-Drehmoment-Fühler in Form einer 6-Komponenten-Waage bekannt (Perry und Lissner, 1955, Seite 215), bei der in zwei übereinanderliegenden Etagen jeweils vier Stützen angeordnet sind, mit denen zwei Komponenten gemessen werden, wobei eine dritte Komponente in einer dritten Etage über ein Torsionsrohr gemessen und die drei restlichen Komponenten mit Hilfe eines Speichenkreuzes gemessen werden, das vier in einer Ebene liegende Speichen aufweist. Dabei wird als nachteilig angesehen, daß für die Messung von drei Komponenten neun elastische Verbindungsglieder mit mindestens zehn Halbbrücken von Dehnungsmeßstreifen benötigt werden, so daß eine kompakte Konstruktion mit einer hohen Eigenfrequenz nicht möglich ist. Ferner ist eine derartige Anordnung als Grundlage für ein Universalmeßgerät nicht ohne weiteres geeignet.

Es ist deshalb Aufgabe der Erfindung, einen Kraft-Drehmoment-Fühler der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Art unter möglichst weitgehender Vermeidung der genannten Nachteile und Schwierigkeiten derart zu verbessern, daß bei möglichst einfacher und kompakter Konstruktion praktisch keine die Biegunsmessung verfälschenden Komponenten auftreten können.

Diese Aufgabe wird bei einem Kraft-Drehmoment-Fühler der im Oberbegriff des Anspruchs 1 genannten Art erfindungsgemäß durch den Gegenstand des Patentanspruchs 1 gelöst.

Besondere Vorteile der Erfindung sind darin zu sehen, daß ein derartiger Fühler eine sehr einfache geometrische Gestalt aufweist, die eine robuste und sehr starre Konstruktion ermöglicht, bei der beispielsweise die starre Verbindung zwischen den Platten und dem Zwischenstück sowie den Stützen und den Speichen dadurch erreicht werden kann, daß die gesamte Anordnung aus einem einzigen Metallstück gefräst oder gedreht wird. Außerdem kann der Fühler in einfacher

Weise gegen Überlastung geschützt werden, beispielsweise durch Befestigung einer Arbeitsplatte an der Aufnehmerplatte mit Hilfe von Bolzen, um eine Begrenzung durch Anschlag an die Grundplatte zu bewirken.

Anhand der Zeichnungen soll die Erfindung nunmehr beispielsweise näher erläutert werden. Es zeigen

Fig. 1 und 2 schematische Darstellungen zur Erläuterung der Arbeitsweise bekannter Kraft-Drehmoment-Fühler,

Fig. 3 das Prinzip der in der DE-OS 25 29 796 beschriebenen Anordnung als Erläuterung,

Fig. 4 einen Aufriß bzw. eine Draufsicht auf ein Ausführungsbeispiel,

Fig. 5 eine Darstellung eines abgewandelten Ausführungsbeispiels,

Fig. 6a und 6b Darstellungen der auf einen Stab wirkenden Quer- bzw. Längskraft und

Fig. 7a und 7b Darstellungen eines Moments um eine tangentielle Achse bei einem bzw. bei zwei Speichenkreuzen.

Bei dem in Fig. 4 dargestellten Ausführungsbeispiel ist eine Grundplatte 1 vorgesehen, parallel zu der eine Lastaufnehmerplatte 2 angeordnet ist. Die Grundplatte 1 ist mit über vier vertikal zu einer Ebene gelegene Stützen 5 starr mit einem als Ring ausgebildeten Zwischenstück 3 verbunden. Der Ring 3 ist über vier Speichen 4, welche in einer Ebene der Lastaufnehmerplatte 2 liegen, mit derselben starr verbunden. Die Stützen 5 können gegenüber den Speichen 4 um 45° versetzt sein. An den Ober- und Unterseiten der Speichen 4 und an den senkrecht zur Ringperipherie liegenden Seiten der Stützen 5 sind bei diesem Ausführungsbeispiel Dehnungsmeßstreifen 6 bzw. 7 angebracht, welche die Verkrümmungen messen. Statt der Verkrümmungen können auch die senkrechten Verschiebungen von mindestens drei Punkten der Lastaufnehmerplatte 2 gegenüber der Ebene des Ringes 4 und die waagerechten Verschiebungen von mindestens drei Punkten auf der Lastaufnehmerplatte 2 oder des Rings 4 gegenüber der Grundplatte 1 mittels Verlagerungsgebern, wie es in der DE-OS 25 29 796 beschrieben wird, gemessen werden.

Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Lastaufnehmerplatte 2 kreisförmig ausgebildet, und der Ring 3 ist ein Kreisring. Diese beiden Elemente können jedoch auch quadratisch oder rechteckförmig ausgebildet sein. Anstelle von vier Speichen und vier Stützen können auch drei Speichen und drei Stützen vorgesehen sein. Diese Anordnung ist insbesondere dann sinnvoll, wenn auch die Grundplatte 1 eine kreisförmige Gestalt hat.

Die Dicke und Breite des Zwischenstücks 3 ist zweckmäßigerweise mindestens doppelt so groß wie die entsprechenden Abmessungen der Speichen und Stützen, damit möglichst die gesamte Verformungsenergie in die Speichen und Stützen geht, deren Verformungen gemessen werden.

Im folgenden soll die Arbeitsweise dieses Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. Eine in Richtung e_1 angreifende Normalkraft verbiegt die Speichen 4, während die Stützen 5 infolge der großen Steifigkeit des Rings 3 nur auf Druck belastet werden, was von den Dehnungsmeßstreifen 7 auf den Stützen 5 nicht registriert wird. Eine Tangentialkraft in Richtung e_2 belastet zwei der Speichen 4 auf Druck und die beiden anderen auf Biegung in der Richtung, in der sie von den Dehnungsmeßstreifen nicht registriert wird, aber alle Stützen 5 erfahren Biegungen, die auf zwei dieser

Stützen gemessen werden. Versuche haben Überkoppungen ergeben, die unter 3% liegen. Eine bleibende Verformung infolge Überbelastung verursacht lediglich eine Nullpunktverschiebung der Dehnungsmeßstreifen, die beim Betrieb mit Rechnern ohnehin laufend kompensiert wird.

Dadurch, daß nur Biegeverformungen gemessen werden, wird eine hohe Genauigkeit der Messungen erreicht, denn die als Störungen auftretenden sonstigen Verformungen (Stauchung, Dehnung, Schub) sind um eine Größenordnung kleiner. Um diese Meßmethode durchführen zu können, ist es unabdingbar, daß die Speichen nur in einer Ebene liegen. Wenn dagegen zwei zueinander parallele Speichenkreuze in Tandemanordnung (siehe Fig. 7b) verwendet werden, wie dies in Gen. Mot. Engin. J. 11 (1964), 4, Fig. 5 angegeben ist, wird, ganz gleich, ob die Längsdehnungen oder die Biegeverformungen gemessen werden, eine um eine Größenordnung geringere Empfindlichkeit erhalten. Dieser Sachverhalt soll an einem Beispiel näher erläutert werden.

Ein Stab, der mit einer Längskraft P auf Druck belastet wird (siehe Fig. 6b), erfährt eine Stauchung in der Größe von

$$\epsilon_{\text{längs}} = \frac{P}{Ebh} \quad (3)$$

wobei E der Elastizitätsmodul, b die Breite des Stabes und h die Dicke des Stabes ist.

Um die entsprechende Stauchung bzw. Dehnung bei der Querbelastung zu ermitteln (siehe Fig. 6a), muß die Biegelinie des zweiseitig eingespannten Stabes

$$y = \frac{Px^2 l}{12B} (3 - 2x/l) \quad (4)$$

wobei y die Auslenkung, x die Entfernung vom linken Stabende, l die Länge des Stabes und $B = Ebh^3/12$ ist, zweimal differenziert werden, so daß sich ergibt:

$$y'' = \frac{Pl}{2B} (1 - 2x/l). \quad (5)$$

Die maximale Dehnung ist dann gleich

$$\epsilon_{\text{quer}} = \frac{h}{2} y''(0) = \frac{Plh}{4B} = \frac{3Pl}{Ebh^2}. \quad (6)$$

Hieraus ergibt sich beispielsweise für $b = h = 3$ mm ein Verhältnis von

$$\epsilon_{\text{quer}} / \epsilon_{\text{längs}} = 3 \cdot l/h = 15. \quad (7)$$

Es werden nunmehr die Verhältnisse bei Belastung eines einfachen Speichenkreuzes (siehe Fig. 7a) und einer Tandemanordnung (siehe Fig. 7b) mit einem tangentialen Moment M betrachtet. Im ersten Fall erleiden zwei Speichen eine Verbiegung und liefern eine Dehnung ϵ_{quer} nach Gl. (6), in der Pl durch $MU(2R)$ zu ersetzen ist:

$$\epsilon_{\text{quer}} = \frac{3M}{Ebh^2} \frac{1}{R}. \quad (8)$$

In diesem Fall treten neben den Verbiegungen der vier Speichen zusätzliche Dehnungen und Stauchungen durch Längskräfte auf. Nur ein Teil ξM des Moments wird von den Verbiegungen, der Rest $(1 - \xi)M$ wird von

den Dehnungen aufgenommen.

Die entsprechende Dehnung folgt aus Gl. (3), in der P durch $(1 - \xi)M/(4L)$ zu ersetzen ist:

$$\epsilon_{\text{längs, Tandem}} = \frac{M(1 - \xi)}{4EbhL}. \quad (9)$$

Entsprechend ist in Gl. (8) jetzt M durch $\xi M/2$ zu ersetzen:

$$\epsilon_{\text{quer, Tandem}} = \frac{3\xi M}{2Ebh^2} \frac{1}{R}. \quad (10)$$

Um die Konstante ξ zu bestimmen, ist die gesamte elastische Energie aufzustellen und anschließend ihre Ableitung nach ξ gleich Null zu setzen (Prinzip der virtuellen Verrückung):

$$V = 4 \int_0^l B y'^2 dx + 4Pl \epsilon_{\text{längs}},$$

mit

$$y'' = \frac{\xi M}{4} \frac{1}{R} \frac{1}{2B} (1 - 2x/l),$$

$$\epsilon_{\text{längs}} = \frac{(1 - \xi)M}{4EbhL}.$$

und hieraus ergibt sich

$$V = \frac{1}{B} \frac{\xi^2 M^2}{16} \frac{l^3}{R^2} \frac{1}{3} + \frac{1}{L} \frac{M^2 (1 - \xi)^2}{4EbhL} \quad (11)$$

$$= \frac{M^2 l}{4Ebh} \left(\frac{\xi^2}{h^2 R^2} + \frac{(1 - \xi)^2}{L} \right)$$

Durch Differenzieren nach ξ und Nullsetzen folgt hieraus.

$$\xi = \frac{1}{1 + (L/R)^2 (l/h)^2}. \quad (12)$$

Mit den oben angegebenen Abmessungen und $L/R = 1/2$ (siehe Fig. 5 in Gen. Mot. Engin. J. 11 (1964)) ergibt sich

$$\xi = 4/29. \quad (13)$$

Hieraus folgen die Verhältnisse der gemessenen Dehnungen in den verschiedenen Konstruktionsanordnungen:

$$\epsilon_{\text{quer}} / \epsilon_{\text{quer, Tandem}} = 2/\xi = 29/2, \quad (14)$$

$$\epsilon_{\text{quer}} / \epsilon_{\text{längs, Tandem}} = \frac{12Ll}{(1 - \xi)Rh} = 25.30/21. \quad (15)$$

Welche Dehnung auch gemessen wird, bei der Tandemanordnung liegt die Meßempfindlichkeit um eine Größenordnung schlechter.

Bei dem in Fig. 5 dargestellten, abgewandelten Ausführungsbeispiel ist eine ringförmige Grundplatte 1 über ein massives Mittelstück 3 mit der Aufnehmerplatte 2 verbunden. Verbindungselemente sind die parallel zur Grundplattenebene liegenden Speichen 4 und die senkrecht dazu verlaufenden Stützen 5, auf den Stützen werden mittels der Dehnungsmeßbrücken 7 die Tangentialkräfte und das senkrecht zu Grundplatten-

ebene liegende Drehmoment gemessen. Eine Arbeitsplatte 8, welche an der Aufnehmerplatte 2 mittels der Bolzen 9 befestigt ist, bewirkt eine Begrenzung durch Anschlag an die Grundplatte 1.

Eine starre Verbindung kann dadurch erreicht werden, daß die Anordnung 1-2-3 aus einem Stück gedreht bzw. gefräst wird. Diese starre Verbindung kann jedoch auch durch andere Verfahren, beispielswei-

se durch Hartlöten, erreicht werden, was besonders bei größeren Anordnungen zweckmäßig erscheint.

Statt der Dehnungsmeßstreifen 6 und 7 können auch Verlagerungsgeber 10 verwendet werden, welche die relativen Verschiebungen zwischen der Grundplatte 1 und der Aufnehmerplatte 2 messen, und zwar in zwei zueinander senkrechten Richtungen, wie dies in Fig. 5 dargestellt ist.

Hierzu 4 Blatt Zeichnungen

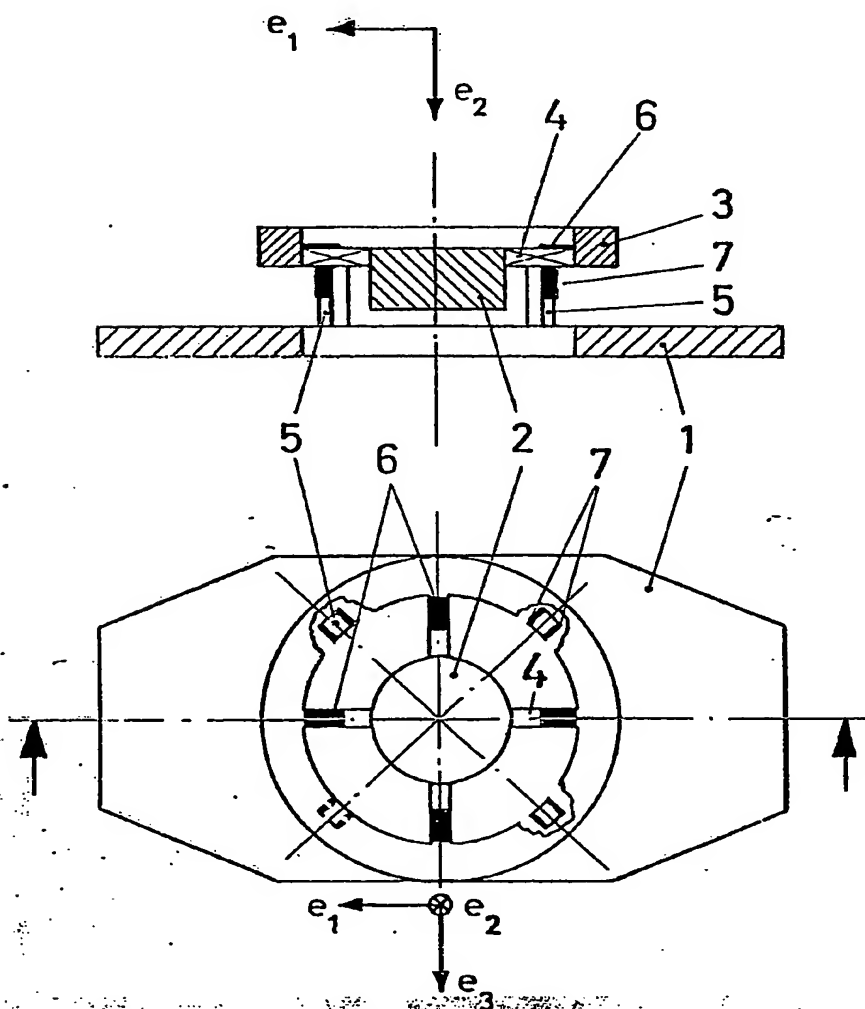


Fig. 4

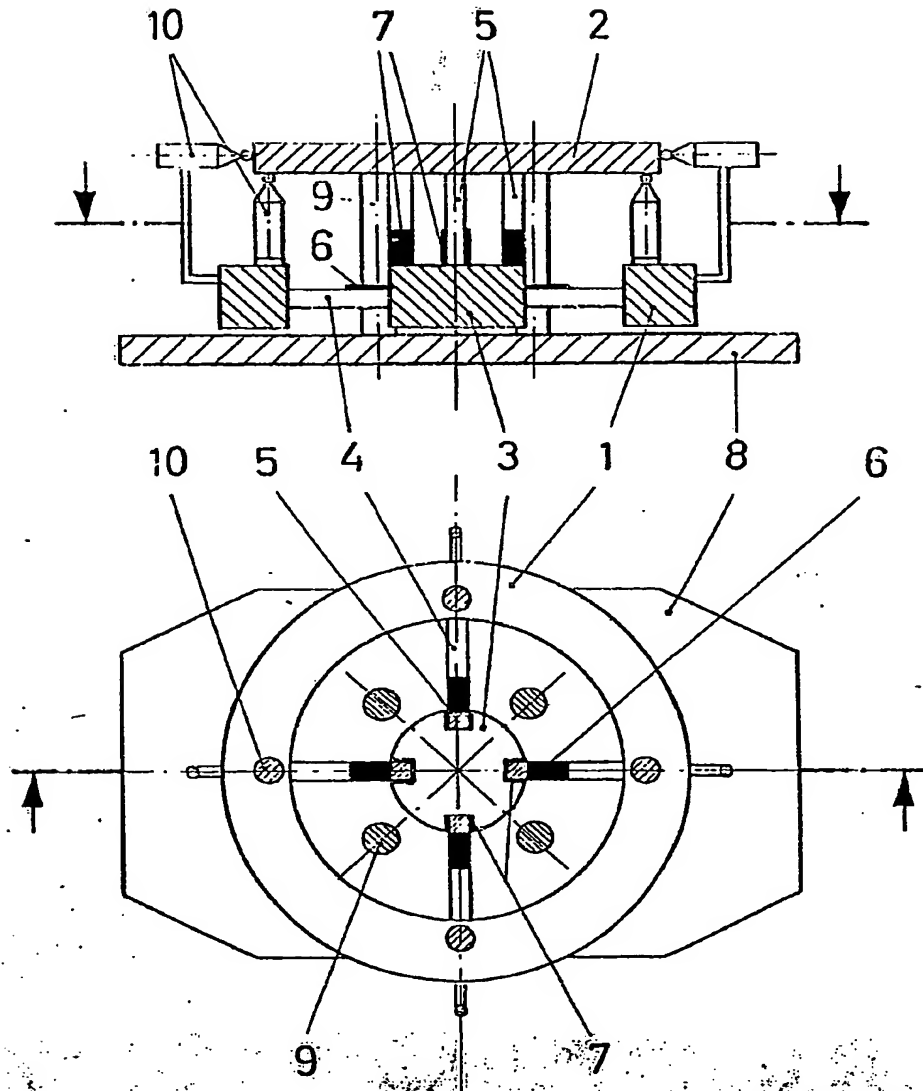


Fig. 5

FIG. 6

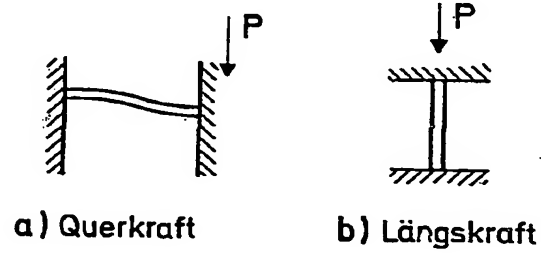


FIG. 7

